

## **Avaliação da segurança e reforço sísmico de edifícios de concreto armado**

Humberto Varum (1)

(1) *Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro*  
email: [hvarum@ua.pt](mailto:hvarum@ua.pt)

*Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro*  
3810-193 Aveiro - Portugal

*Palavras Chaves: avaliação da segurança sísmica; reforço sísmico*

### **I INTRODUÇÃO**

Sismos recentemente ocorridos em todo o mundo têm demonstrado que a investigação na engenharia sísmica deve ser direccionada para a avaliação da vulnerabilidade das construções existentes, desprovidas de adequadas características resistentes. O seu reforço deve ser realizado, reduzindo a sua vulnerabilidade e consequentemente o risco para níveis aceitáveis. O desenvolvimento de técnicas de reforço adequadas a este tipo de estruturas tem um papel principal. São descritas as causas mais frequentes de dano e colapso em edifícios existentes de betão armado e as técnicas de reforço mais adequadas para este tipo de estruturas. São brevemente apresentados os resultados mais relevantes de ensaios de avaliação do desempenho de estruturas existentes de betão armado, bem como de algumas técnicas de reforço. São discutidas as vantagens e limitações de cada uma destas técnicas.

### **2 DIMENSIONAMENTO DE EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO FACE À ACÇÃO SÍSMICA**

Sismos recentes (por exemplo: Bucharest, Roménia, 1977; Montenegro, Jugoslávia, 1979; Açores, Portugal, 1980; Campania, Itália, 1980; Kalamata, Grécia, 1986; Umbria/Marche, Itália, 1997; Açores, Portugal, 1998; Kocaeli, Turquia, 1999; Atenas, Grécia, 1999; Molise, Itália, 2002; Aquila, Itália, 2009) confirmam que o Mundo poderá sofrer com a elevada vulnerabilidade do património edificado em betão armado. Por um lado, a grande maioria de edifícios em zonas de perigosidade sísmica considerável na Europa construídos até aos anos 80 apresenta um deficiente comportamento sísmico. De facto, até os anos 60, a regulamentação estrutural não possuía critérios específicos de dimensionamento sísmico e, desde então, apenas métodos simplificados de cargas horizontais equivalentes foram utilizados no dimensionamento dos edifícios. As primeiras normas nacionais que contemplam uma filosofia de cálculo e pormenorização na linha da actual

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

regulamentação aparecem na Europa apenas no início dos anos 80 (por exemplo: [1]). Por outro lado, a experiência mundial em sismos do passado e recentes tem demonstrado que os edifícios de betão armado não dimensionados ao sismo e com pormenorização inadequada são o tipo de estruturas mais vulneráveis, representando assim um enorme risco económico e para as vidas humanas em sismos futuros.

Além disto, as estruturas de betão armado têm sido as mais utilizadas na construção de edifícios nos países do Sul da Europa. Por exemplo, um estudo recente [2] sobre o parque residencial revela a predominância dos edifícios de betão armado. O estudo revela que 56% dos edifícios residenciais em Portugal foram construídos entre 1961 e 1991, e 75% tem menos de 50 anos. O estudo evidencia que desde a sua introdução, em 1935-1940, o número de edifícios de betão armado cresceu rapidamente. Em 1991, 45% das famílias residem em edifícios de betão armado. Silva-Araya *et al.* [3], por exemplo, também referem que a maioria dos edifícios nas Américas são de betão armado. Assim, a nível mundial, a predominância dos edifícios existentes em betão armado constitui uma grande fonte de risco sísmico para as populações e economias, como demonstrado no estudo conduzido pelo LNEC [2, 4].

No entanto, reconhecimentos pós-sismo e análise do comportamento de estruturas em sismos recentes têm evidenciado claramente, que a existência de regulamentação sísmica avançada, em zonas de perigosidade sísmica média/alta, não garante o bom desempenho dos edifícios e das suas partes [5]. As razões para tal são discutidas em detalhe em [6] e podem ser resumidas no que se segue. Em primeiro lugar, existem muitas incertezas em muitos aspectos relacionados com os modelos numéricos usados no dimensionamento, nomeadamente em relação à definição do sismo de projecto, na estimativa da resposta estrutural, e na modelação do comportamento solo-estrutura. Em segundo lugar, o desempenho do sistema estrutural face a um sismo depende muito de aspectos locais de pormenorização e do seu estado de conservação. Assim, na análise das estruturas deve ser realizada com modelos refinados e rigorosos, e devem ser consideradas todas as modificações estruturais, reparações e reforços. Tomemos o exemplo da Turquia, onde a regulamentação para o cálculo sísmico é muito similar à utilizada na Califórnia. A norma turca de 1975 inclui recomendações e exigências para sistemas estruturais resistentes aos sismos, como [7]: a) menor espaçamento de estribos e cintas na vizinhança dos nós viga-pilar; b) armadura de esforço transversal nos nós viga-pilar; c) dimensionamento ao corte dos nós; d) recomendações para evitar mecanismos viga forte-pilar fraco; etc. Assim, edifícios recentes na Turquia deveriam ter tido um comportamento satisfatório, com danos leves a moderados durante o sismo de 1999, em Kocaeli, uma vez que a intensidade deste sismo foi moderada. De facto, muitos edifícios recentes tiveram um mau comportamento porque estes foram mal dimensionados, construídos ou localizados em zonas de grande aceleração sísmica, ou na vizinhança de falhas sísmicas. Estes factores de risco devem ser definitivamente entendidos e tratados pelos proprietários dos edifícios existentes.

### 3 DANOS EM EDIFÍCIOS DE B.A. SOLICITADOS POR SISMOS

A existência de regulamentação sísmica actualizada não é suficiente para garantir a segurança das estruturas face aos sismos, se esta não for devidamente aplicada no projecto das estruturas. Para garantir o bom desempenho de uma construção face a um sismo é necessário garantir a qualidade do projecto e da construção. Sismos recentes têm demonstrado que a qualidade de construção é altamente condicionante do desempenho sísmico global das estruturas. Nas zonas afectadas pelo sismo de 17 de Agosto de 1999, na Turquia, a maioria dos edifícios recentes em betão armado foram já dimensionados de acordo com a actual regulamentação sísmica. No entanto, deficiências construtivas ditaram o colapso de um número significativo de edifícios e danos severos em outros (Figura 1). As causas mais frequentes de danos e colapso de edifícios de betão armado sujeitos à acção sísmica aparecem associadas aos seguintes efeitos/mecanismos: estribos/cintas e confinamento; ductilidade, aderência; ancoragem e sobreposição; inadequada capacidade de resistência ao corte; inadequada capacidade resistente à flexão; inadequada resistência ao corte em nós; influência das paredes de alvenaria no comportamento sísmico das estruturas; irregularidades em planta e em altura (mudança brusca das características estruturais e/ou dos elementos); influência dos modos altos; e, mecanismo do tipo viga forte-pilar fraco.



Figura 1 - Danos provocados pelo sismo de Izmit, Kocaeli, Turquia, a 17 de Agosto de 1999

### 4 SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE B.A.

O comportamento eficiente dos edifícios face à acção sísmica pode ser conseguido com um adequado sistema resistente, com distribuição apropriada de rigidez e massa e com adequada pormenorização dos seus componentes estruturais e não estruturais. A selecção da estratégia de reforço e sua implementação devem basear-se em resultados de uma avaliação estrutural rigorosa. A reabilitação sísmica das estruturas pode seguir duas estratégias: a) reabilitação ou melhoramento do sistema estrutural global; e b) reabilitação ou reforço dos elementos estruturais. Uma estratégia de reforço global da estrutura será adequada se os seus elementos não forem muito frágeis e se tiverem um bom comportamento para solicitações sísmicas na estrutura reabilitada. Para estruturas com deficiente

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

comportamento sísmico, dificilmente as estratégias de reabilitação a nível local são suficientes para melhorar o seu comportamento sísmico. Mas, na maioria dos casos, a melhor solução de melhoramento sísmico passa pela combinação destas duas estratégias.

Como salientado por Fardis [8], "qualquer intervenção de reabilitação não deverá prejudicar a capacidade resistente e a segurança de nenhum elemento estrutural em nenhuma característica". Assim, no dimensionamento de uma solução de reforço, o projectista deverá, por exemplo, garantir que: a) o aumento da capacidade resistente de um elemento em flexão não o torna frágil em corte; b) o reforço das vigas não transfere as rótulas plásticas para os pilares; c) a capacidade resistente dos nós viga/pilar; d) a continuidade do 'caminho das forças', garantindo a transferência em segurança das forças de inércia dos elementos onde estas surgem, para os elementos do sistema resistente, e até às fundações; e) a segurança das ligações entre elementos existentes na estrutural original e elementos de reforço; f) a estrutura reforçada não tenda a concentrar os danos numa zona localizada não preparada para tal (por exemplo, a adição de paredes resistentes ou contraventamentos ou reforço de pilares num determinado piso poderá tender a concentrar o dano no piso imediatamente acima deste).

Nos pontos que se seguem são descritas as mais comuns técnicas de reabilitação e reforço de edifícios existentes de betão armado. Sublinha-se que na reabilitação de edifícios é usual recorrer-se à combinação de várias técnicas e/ou estratégias de reforço.

### 4.1 Técnicas de reforço global do sistema estrutural

Estratégias de reforço global do sistema estrutural são geralmente menos onerosas que o reforço universal dos componentes do sistema estrutural, especialmente se o reforço dos elementos estruturais obrigar à desocupação temporária do edifício, demolição e reconstrução das paredes de alvenaria de enchimento, tectos falsos, redes e outros elementos não estruturais. Isto é particularmente verdade para estruturas extremamente flexíveis. A resposta inadequada dos edifícios à acção sísmica é, em muitos casos, devido à presença de irregularidades estruturais em termos de massa, rigidez ou resistência, tais como *soft* ou *weak-storeys* e irregularidades em planta que induzem torção global. Estratégias de reforço eficientes e económicas para a correcção ou redução destas irregularidades poderão passar por: a) demolição parcial (esta técnica poderá ter um impacto significativo na estética e utilização do edifício); b) adição de sistemas resistentes (pórticos), de contraventamento ou paredes resistentes de betão armado no *soft/weak-storey* ou correcção da distribuição de rigidez e massa nos pisos; e, c) introdução de juntas de dilatação (um edifício irregular pode ser transformado em várias estruturas regulares).

Nos anos 90 verificaram-se aumentos significativos no investimento no desenvolvimento e na utilização de sistemas de dissipação de energia para a protecção de edifícios face aos sismos. Estas técnicas de reabilitação de



## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

edifícios são viáveis e eficientes na reabilitação de edifícios. Outras técnicas baseadas em sistemas especiais de protecção, como controlo activo, dispositivos híbridos activo/passivo de dissipação de energia, *tuned mass* e *tuned liquid dampers*, poderão também tornar-se soluções eficientes num futuro próximo. Estes sistemas de reabilitação protegem os edifícios durante a ocorrência de um sismo, modificando as suas características de comportamento. Algumas das técnicas de reforço e melhoramento do comportamento global mais comuns são expostas no que se segue.

### 4.1.1 Adição de paredes resistentes de betão armado

Uma das técnicas mais usadas no reforço de edifícios com comportamento sísmico deficiente baseia-se na aplicação de novas paredes de betão armado adequadamente distribuídas na estrutura [8, 9, 11]. As novas paredes protegem os elementos existentes, controlando a deformação lateral dos pisos. Estas paredes resistentes não só aumentam a rigidez lateral significativamente, como também, normalmente, aliviam os pórticos originais das forças sísmicas. O recurso a paredes resistentes para completar o caminho das forças, pode também corrigir descontinuidades. Os novos elementos de parede recebem a maior parte das cargas laterais. Se as paredes têm uma rigidez e resistência adequada para suportar a totalidade das cargas laterais, as debilidades dos pórticos (como *soft-storey*, pilar curto, etc.) normalmente não conduz a um comportamento indesejado. Porém, a adição de novas paredes resistentes diminuirá o período natural da estrutura, o que poderá aumentar a solicitação sísmica consideravelmente.

Quando é possível intervir no exterior dos edifícios, a adição de paredes resistentes ou sistemas de contraventamento nas fachadas torna-se muito competitiva em relação as soluções que passam pelo reforço generalizado dos elementos resistentes de toda a estrutura, particularmente se estas últimas forcem a desocupação temporária do edifício. Na reabilitação de estruturas porticadas, esta técnica poderá passar pelo preenchimento total ou parcial de alguns vãos dos pórticos originais. Em alguns casos o recurso a painéis pré-fabricados, desde que garantida a adequada ligação entre os painéis pré-fabricados e o pórtico envolvente, poderá revelar-se uma boa solução de reforço sísmico, reduzindo os tempos de construção e custos associados da intervenção (alguns exemplos de aplicações recentes após os sismos de 1995 em Kobe e de Erzincan em 1992 [10, 11]). A adopção desta técnica de reforço poderá implicar o reforço do sistema de fundações para resistir a maiores acções sísmicas e peso próprio da estrutura. Os trabalhos de reforço das fundações são normalmente muito dispendiosos e tecnicamente exigentes, tornando-se assim, por vezes, impraticável, particularmente para edifícios com fundações deficientes. A distribuição das novas paredes resistentes deve ser pensada de forma a evitar irregularidades de rigidez e resistência que possam induzir a torção do edifício.

## 4.1.2 Contraventamentos metálicos

O reforço global do sistema estrutural pode também ser realizado com contraventamentos metálicos. Se o objectivo do reforço é melhorar a rigidez da estrutura, o reforço com base em sistemas de contraventamento não é tão eficiente como o reforço com recurso às paredes resistentes. A capacidade de reforçar edifícios em rigidez com contraventamentos é algo limitada, pois a mobilização do funcionamento dos contraventamentos exige a instalação de níveis de deslocamento consideráveis. O reforço de edifícios com contraventamentos metálicos é realizado em vãos seleccionados de forma a dotar a estrutura de adequada capacidade resistente aos sismos. As diagonais do contraventamento são normalmente ligadas a outras peças em aço horizontais e verticais, que por sua vez são continuamente ligadas às vigas e pilares em redor do sistema de contraventamento.

O reforço com contraventamentos metálicos, normalmente, não exige intervenções de reforço nas fundações, e a sua montagem não é tão interventiva como a adição de paredes resistentes. No entanto, a ligação entre os elementos em aço do reforço e os elementos existentes de betão armado poderá ser laboriosa e cara. Os contraventamentos são, por conveniência, normalmente instalados nas fachadas, minimizando os trabalhos e distúrbios na sua instalação. A posição dos contraventamentos também será condicionada por restrições arquitectónicas, como as aberturas.

Aos sistemas de contraventamento metálico podem ser acoplados dispositivos de dissipação de energia ou *shear-links*, aumentando significativamente o amortecimento do sistema estrutural [12, 13]. No sismo de Michoacán, em 1985, inúmeros edifícios de betão armado previamente reforçados com contraventamentos metálicos tiveram um bom comportamento, e praticamente não se verificou nenhum dano estrutural [14, 15, 16].

## 4.1.3 Isolamento de base

O recurso a técnicas de isolamento de base das estruturas, incluindo dispositivos de dissipação de energia, como medida de protecção sísmica está a revelar-se uma técnica promissora. A ideia básica é controlar a solicitação que actua sobre a base da estrutura, suprimindo a interacção entre o solo e a superestrutura. Assim, a vibração da superestrutura, e consequente dano são reduzidos. Os sistemas de isolamento reduzem as forças transmitidas à superestrutura, aumentando o período da estrutura e o amortecimento global.

Com esta técnica é construída uma dupla fundação, separada por um sistema de isolamento que garante a descontinuidade entre a superestrutura e a fundação do sistema estrutural. Deste modo, a estrutura é desacoplada da solicitação sísmica e a maioria da energia induzida pelo sismo é absorvida pelos dispositivos de isolamento [5, 8, 9]. As três propriedades básicas de um

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

sistema de isolamento são [17]: a) flexibilidade horizontal para aumentar o período da estrutura e reduzir o valor espectral da solicitação; b) dissipação de energia (amortecimento) para reduzir os deslocamentos; e, c) rigidez suficiente para pequenos deslocamentos de forma a verificar os estados limites para acções de serviço. Em condições favoráveis, o isolamento de base poderá reduzir o *drift* nas estruturas correntes de um factor que poderá variar de 2 a 5, em relação ao equivalente numa estrutura não isolada.

A aplicação desta técnica no melhoramento do comportamento sísmico de estruturas de betão armado é viável, particularmente no caso de edifícios para os quais é fundamental que estejam operacionais e habilitados para ocupação imediata após um sismo, por exemplo, hospitais, e outros edifícios cujos conteúdos devem de ser protegidos (museus, etc.). O isolamento sísmico é uma técnica muito efectiva na reabilitação de edifícios muito rígidos, baixos e com massa considerável. Contudo, é uma solução dispendiosa e a sua aplicação em edifícios correntes não é competitiva [9]. O isolamento sísmico e os sistemas de dissipação de energia não são estratégias de reforço competitivas para a maioria dos edifícios. Geralmente, estas técnicas são mais aplicáveis na reabilitação de edifícios cujos proprietários desejam exigentes níveis de desempenho e estão dispostos a pagar custos elevados associados ao dimensionamento, produção e instalação destes sistemas.

### 4.1.4 Sistemas passivos de dissipação de energia

Sistemas passivos de dissipação de energia são uma técnica emergente que se baseia no melhoramento do desempenho estrutural pelo aumento da capacidade de dissipar energia (e em alguns casos rigidez) do edifício. Sistemas de dissipação de energia podem ser usados em combinação com o isolamento de base, ou podem ser inseridos nos contraventamentos metálicos adoptados no reforço de estruturas existentes. Em condições favoráveis, os sistemas passivos de dissipação de energia poderão reduzir as deformações entre pisos de um factor de 2 a 3 vezes, se o sistema não aumentar a rigidez da estrutura. Se o sistema de reforço aumentar a rigidez da estrutura, esta redução poderá ser ainda maior. Esta solução é eficaz em estruturas relativamente flexíveis e que tem alguma capacidade de deformação inelástica, porque exige o desenvolvimento de níveis consideráveis de deslocamentos horizontais.

### 4.1.5 Redução da massa

As forças e deformações induzidas nas estruturas pela acção sísmica são controladas pela rigidez e a massa da estrutura. Assim, a redução de massa de um edifício pode ser considerada como uma técnica económica e eficiente no melhoramento do comportamento estrutural, nomeadamente através de: a) demolição dos pisos elevados e *penthouses*; b) substituição de divisórias e acabamentos pesados; e, c) remoção de equipamento pesado.

## 4.1.6 Outras técnicas

Outras medidas especiais de protecção sísmica, incluindo controlo activo, sistemas híbridos activo-passivo de dissipação de energia, *tuned mass* e *tuned liquid dampers*, poderão também revelar-se, em certas aplicações, soluções eficientes de reabilitação sísmica de edifícios existentes de betão armado num futuro próximo.

## 4.2 Técnicas de intervenção ao nível dos elementos estruturais

Alguns edifícios existentes possuem características de resistência e rigidez apropriadas. Contudo, alguns dos seus componentes não tem adequada resistência, rigidez ou capacidade de deformação, para satisfazer os objectivos de desempenho impostos à estrutura. Estas deficiências, em termos de resistência, rigidez e/ou ductilidade, podem ser corrigidas recorrendo a várias técnicas. As técnicas de intervenção ao nível dos elementos estruturais desempenha um papel importante na reparação e reforço de estruturas para as quais apenas um reduzido número de elementos apresenta deficiências estruturais ou sofreram dano durante sismos anteriores. Modificações locais ao nível dos componentes deficientes podem ser realizadas, mantendo a configuração básica do sistema resistente às acções horizontais. O reforço ao nível dos elementos tende a ser a estratégia mais económica na reabilitação, quando apenas alguns elementos apresentam deficiências. No que se segue são apresentadas algumas das técnicas mais comuns de reforço ao nível do elemento.

### 4.2.1 Injecção de resinas epoxy

A injecção de resinas é a técnica mais amplamente utilizada na reparação de elementos de betão armado com fissuras de baixa e média abertura. Esta técnica de reparação é efectiva desde que o caminho de injecção nas fendas esteja desimpedido. Em elementos danificados a resistência original pode ser reinstalada por reparação com injecção de resinas, principalmente para elementos com reduzida armadura.

### 4.2.2 Encamisamento

A técnica de reforço mais comum para melhorar o desempenho de elementos de betão armado (pilares, paredes, vigas ou nós viga-pilar) é o encamisamento. Esta técnica é particularmente eficiente na correcção de deficiências em resistência ao corte e à flexão e/ou capacidade de deformação, na correcção de zonas com insuficiente comprimento de sobreposição das armaduras nas zonas das emendas. Normalmente, não é



## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

uma estratégia económica para o reforço e aumento da rigidez generalizada, porque implicaria intervenções em praticamente todos os elementos verticais da estrutura, aumentando não só os custos directos, como os associados à desocupação temporária dos edifício. O encamisamento pode ser realizado com recurso a chapas de aço, mantas de fibras de carbono, ou por aplicação de uma camada exterior de betão armado. No reforço por encamisamento os novos materiais devem ser dimensionados e aplicados em condições propícias para trabalhar em conjunto com os elementos existentes de betão armado.

**Encamisamento em betão armado:** Para elementos severamente danificados, ou com resistência insuficiente, o encamisamento em betão armado pode ser usado para melhorar a sua rigidez, resistência e ductilidade. Este é o tipo de encamisamento mais utilizado na reparação e reforço de elementos de betão armado. Com excepção da necessidade de soldar ligadores metálicos entre a armadura existente e a armadura a aplicar no encamisamento a ser aplicado, esta técnica não requer uma particular especialização técnica na sua aplicação. Encamisamentos em betão podem incorporar armadura longitudinal e transversal, melhoram a resistência em flexão e corte, a capacidade de deformação (através dos efeitos de confinamento a prevenção da encurvadura da armadura longitudinal), e corrigem a resistência nas zonas das emendas da armadura longitudinal.

**Encamisamento metálico:** Podem ser usados para melhorar o confinamento. Deve salientar-se que o reforço com elementos metálicos colados aos existentes de betão armado obriga a cuidados especiais na sua protecção contra o fogo, e, por outro lado, o comportamento a longo prazo do material de ligação (resinas epoxy) não é profundamente conhecido [10].

**Encamisamento com recurso a fibras de carbono:** O reforço de elementos de betão armado com recurso a fibras de carbono tem encontrado recentemente inúmeras aplicações [18, 19]. De entre estas aplicações destacam-se o reforço e confinamento de pilares nas suas zonas críticas, e o reforço em flexão de vigas e lajes. A eficiência do reforço de pilares com fibras de carbono depende essencialmente da capacidade de aumentar a sua ductilidade (que por sua vez depende do grau de confinamento) e a resistência. A flexibilidade das mantas de carbono possibilita a sua fácil aplicação sobre pilares, quer circulares, quer rectangulares. O peso reduzido dos materiais compósitos (tipicamente um quinto do aço) simplifica e reduz os custos da sua aplicação em obra. As mantas são muito finas, não alterando normalmente a estética da estrutura. As fibras de carbono possuem uma elevada resistência electroquímica, justificando-se mais ainda a sua utilização em ambientes mais agressivos. No entanto, os raios ultravioletas podem afectar severamente alguns tipos de fibras de carbono.

### 4.2.3 Shotcrete

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

Esta técnica é frequentemente adoptada em combinação com o encamisamento em betão armado no reforço dos pilares e paredes. Consiste na projecção de um betão com elevado conteúdo em cimento e agregados finos nas superfícies dos elementos danificados ou a reforçar. A resistência das finas camadas de betão aplicado é normalmente muito alta, e esta técnica pode ser aplicada em situações onde o recurso a cofragens não é fácil (como nos nós viga/pilar). É também frequentemente aplicada no reforço de paredes de alvenaria.

### 4.2.4 Outras técnicas

Além das técnicas apresentadas anteriormente, existem outras técnicas de reforço aplicáveis ao nível dos elementos [17]:

- Aplicação de pré-esforço em vigas, pilares e nós viga/pilar. Nestes casos as ancoragens devem ser afastadas das regiões onde consideráveis deformações não-lineares e correspondente dano são esperadas, e devem ser calculadas para a solicitação sísmica prevista.
- Modificação do elemento removendo material. Esta é uma técnica frequentemente usada na correcção de deficiências de comportamento estrutural de pórticos preenchidos com painéis de alvenaria. A medida correctiva pode passar pela total remoção dos painéis de alvenaria, ou pela simples separação entre estes e os pilares e vigas envolventes. Na remoção de painéis de alvenaria deve-se evitar a produção de irregularidades estruturais, em planta e em altura.
- Correcção de detalhes de pormenorização da armadura. Esta técnica passa pela remoção do betão de recobrimento, alteração/correcção da pormenorização da armadura existente, e betonagem de uma nova camada de betão de recobrimento. Esta técnica pode ser particularmente útil na reparação/correcção das emendas de armadura longitudinal nos pilares.

## 5 ENSAIOS SOBRE ESTRUTURAS À ESCALA REAL

Estruturas de edifícios à escala real são testadas, tendo como objectivo a avaliação da sua vulnerabilidade sísmica, testando-as para intensidades sísmicas crescentes, e o estudo de técnicas de reparação/reforço apropriadas. Ainda no domínio dos edifícios são investigados os novos conceitos/métodos de projecto (exemplo: DBD).

No âmbito do projecto *ICONS* (Tópico 2 - "*Assessment, Strengthening & Repair*", coordenado pelo LNEC) [20], uma vasta campanha de ensaios foi realizada em pórticos de betão armado, de 4 pisos à escala real, representativas do projecto e da construção característica nos anos 50 nos países do sul da Europa (ver Figura 2). Os principais objectivos desta série de

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

ensaios foram o estudo de vulnerabilidades estruturais e o desenvolvimento e validação de técnicas de reparação e reforço. As técnicas/soluções testadas foram: técnicas selectivas de reforço de pilares (intervindo na resistência, rigidez e/ou ductilidade dos pilares); aplicação de betão projectado com armadura sobre as alvenarias; sistemas de contraventamento com dispositivos de dissipação de energia; e, técnicas baseadas na aplicação de fibras de carbono para reparação de pilares e juntas.

Dois pórticos em betão armado, à escala real, foram construídos e testados para várias intensidades sísmicas. Um dos pórticos em estudo era preenchido com painéis de alvenaria de tijolo (pórtico A) e o outro não (pórtico B). Os materiais usados na construção dos pórticos de betão armado foram os característicos da construção dos anos 50, ou seja, um betão de fraca resistência e armadura de aderência normal. A pormenorização da armadura foi executada segundo o uso corrente daquela época, ou seja, não foram adoptadas regras específicas de pormenorização, nomeadamente provisões particulares relativas à ductilidade, ou pormenorização das emendas e nós, nem estratégias de dimensionamento tendentes a desenvolver mecanismos preferenciais de dissipação de energia. As cargas verticais foram definidas de forma a simular as acções permanentes, para além do peso próprio (revestimentos, divisórias e sobrecarga). A acção sísmica foi definida como sendo representativa de um cenário de casualidade sísmica correspondente a uma zona de média-alta sismicidade na Europa. Os ensaios pseudo-dinâmicos foram realizados considerando três acelerogramas de referência correspondentes aos períodos de retorno de 475, 975 e 2000 anos, aos quais correspondem acelerações máximas de 218, 288 e 373  $\text{cm/s}^2$ , respectivamente.

### 5.1 Pórtico de B.A. sem paredes de alvenaria

Durante os ensaios sobre a estrutura original foi verificada, como prevista, uma grande vulnerabilidade deste tipo de estruturas. De facto, mesmo tendo a estrutura um comportamento satisfatório e com reduzido nível de danos, para o sismo correspondente a um período de retorno de 475 anos, a mesma atingiu o colapso iminente para uma intensidade sísmica correspondente a um período de retorno de 975 anos (com aceleração máxima apenas 1.3 vezes superior do que a do sismo correspondente aos 475 anos). Os testes mostraram uma concentração notória da deformação lateral do pórtico e consequentemente dano no terceiro piso. O mecanismo verificado na estrutura deve-se à irregularidade em altura em termos de rigidez e resistência [21]. Depois destes ensaios o pórtico foi reparado e reforçado de acordo com as técnicas de intervenção selectiva. Dois tipos de intervenção de reforço foram realizados na estrutura: uma baseada no aumento da capacidade resistente à flexão (terceiro e quarto pisos), e corrigindo a irregularidade existente em altura. Ao nível dos três primeiros pisos foram aplicadas cintas em aço de forma a melhorar a ductilidade e a capacidade

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

resistente ao corte. Na Figura 2 são representados esquemas da intervenção efectuada.

Os gráficos na Figura 2 mostram o perfil dos máximos deslocamentos relativos entre pisos, e confirma a eficiência do reforço aplicado. É de notar que apesar das pequenas diferenças detectadas nas duas estruturas no perfil de deslocamentos relativos para o sismo de 475 anos, para o sismo de 975 anos o nível de deformação no terceiro piso da estrutura não reforçada cresce rapidamente originando o colapso do piso. O reforço da estrutura demonstrou corrigir as irregularidades em altura, produzindo respostas sísmicas com distribuições de exigências de deformação muito mais uniformes. A estrutura reforçada foi capaz de resistir a um sismo correspondente a 2000 anos de período de retorno (com aceleração máxima 1.8 vezes superior ao sismo de 475 anos), enquanto que a estrutura não reforçada atingiu o colapso para uma aceleração de base 1.3 vezes superior que a correspondente aos 475 anos. Os resultados obtidos dos testes tornaram evidente a elevada vulnerabilidade sísmica deste tipo de estruturas de betão armado, que constitui uma grande parte dos edifícios existentes em zonas de considerável casualidade sísmica na Europa, projectadas sem ter em conta devidamente a acção sísmica, sendo assim uma fonte de risco para as vidas humanas. Foi ainda demonstrado que com adequadas técnicas e métodos de reforço, pode-se reduzir consideravelmente a vulnerabilidade destas estruturas.

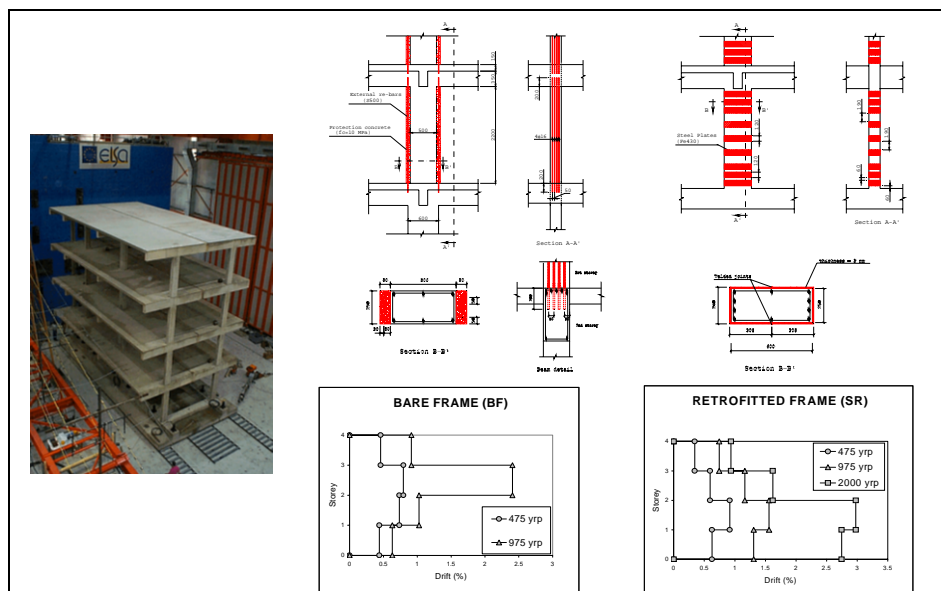


Figura 2 - Vista geral das estruturas; Reforço; Máximo deslocamentos relativo entre pisos

## 5.2 Pórtico preenchida com painéis de alvenaria

O pórtico com alvenaria (IN) foi também sujeito a três sismos de intensidade crescente de forma a avaliar a sua vulnerabilidade e capacidade última. Durante o teste correspondente ao sismo de 2000 anos de período de retorno, as paredes de alvenaria do primeiro piso atingiram o colapso,



## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

induzindo na estrutura um mecanismo tipo *soft-storey*, forçando a paragem do ensaio num ponto correspondente aos 5 segundos do terramoto. Após esta série de ensaios, as alvenarias mais danificadas foram substituídas e foi aplicado um reforço no vão exterior, ao nível dos quatro pisos (Figura 3). O reforço foi realizado com uma camada de betão projectado com 2.5 cm de espessura na qual se embebeu uma rede electrosoldada (diâmetro 5 mm e espaçamento de 10 cm, em ambas as direcções), como se ilustra na Figura 3. A série de ensaios com as alvenarias reforçadas foi designada por SC. A estrutura com a alvenaria reforçada foi capaz de resistir aos três sismos sem atingir o colapso [22]. Dos resultados observados, dois aspectos fundamentais devem ser realçado. Por um lado o efeito benéfico do reforço no comportamento das alvenarias, que evitou a sua fendilhação prematura e esmagamento dos tijolos. Mas, por outro lado, foi verificada a rotura por corte dos pilares exteriores na sua parte superior, conduzindo ao colapso local da estrutura. Esta rotura por corte resulta, por um lado, das forças de corte transmitidas pela alvenaria aos pilares exteriores, e por outro lado, pelo efeito de *overturning moment*.

Na Figura 3 é apresentado o diagrama força de corte versus deformação lateral do primeiro piso, onde se evidencia o efeito benéfico do reforço aplicado. A influência das alvenarias na resposta estrutural foi confirmada durante os ensaios, confirmando que estas devem ser tidas em consideração na avaliação da vulnerabilidade das estruturas existentes, bem como no cálculo de novas estruturas. A alvenaria protegeu da estrutura de betão armado, para os sismos de baixa e média intensidades, mas para o sismo correspondente a um período de retorno de 2000 anos, a alvenaria atingiu o colapso e verificou-se uma queda acentuada da resistência (*softening*) ao nível do primeiro piso, provocando o desenvolvimento súbito de um mecanismo de piso (*soft-storey*). A técnica de reforço utilizada ao nível das alvenarias melhorou substancialmente o seu comportamento, conferindo-lhes um aumento da capacidade de deformação, e minorando ligeiramente o *softening*, melhorando assim o comportamento global da estrutura e consequentemente diminuindo a sua vulnerabilidade.

De salientar que apesar dos ensaios com a alvenaria reforçada terem demonstrado a eficiência do reforço, deve referir-se que a sua eficiência poderia ser melhorada, caso fossem aplicados conectores entre o reforço e a estrutura envolvente, pois como já foi referido, o reforço adoptado acelerou o aparecimento de um mecanismo de rotura dos pilares exteriores devido à transmissão localizada de forças dos painéis de alvenaria para a estrutura envolvente.

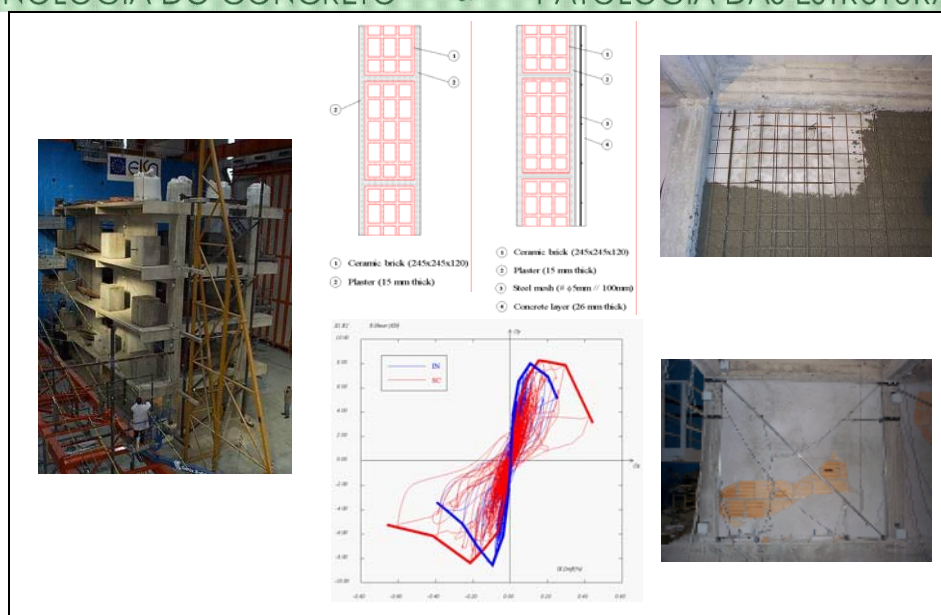


Figura 3 - Pórtico preenchido com painéis de alvenaria: Esquema do reforço da alvenaria; Força-deslocamento ao nível do 1º piso (IN e SC); Danos observados na alvenaria

### 5.3 Contraventamento com dispositivo de dissipação de energia

Foi ainda testada uma técnica de reforço baseada na aplicação de um sistema dúctil, de contraventamento excêntrico em aço e um elemento vertical acoplado, capaz de dissipar energia por deformação em corte, ver Figura 4. Este tipo de reforço não agrava os esforços transmitidos à fundação, e aumenta substancialmente a ductilidade global e a capacidade de deformação da estrutura. O estudo experimental limitou-se à imposição de deslocamentos cíclicos ao nível de segundo piso. O sistema de reforço foi instalado no vão central, tendo sido construídos painéis de alvenaria sem aberturas nos vãos externos, como se ilustra na Figura 4. O sistema de reforço foi idealizado e dimensionado como uma eventual substituição de um painel existente de alvenaria. Assim, o sistema de reforço foi dimensionado para uma resistência correspondente ao painel de alvenaria original [23].

Observou-se um aumento progressivo da energia dissipada ao nível do dispositivo (*shear-link*). De facto, no final do ensaio, cerca de 50% da energia total dissipada, ocorreu no *shear-link*. No gráfico força-deslocamento de piso estão representadas em simultâneo duas curvas, uma referente à curva força de corte total de piso e outra referente à força de corte medida no *shear-link*. É de salientar que os ensaios demonstraram claramente que o sistema de ancoragem do contraventamento à estrutura existente em betão armado foi eficiente e capaz de transmitir as forças ao pórtico envolvente, sem verificar-se algum dano local.

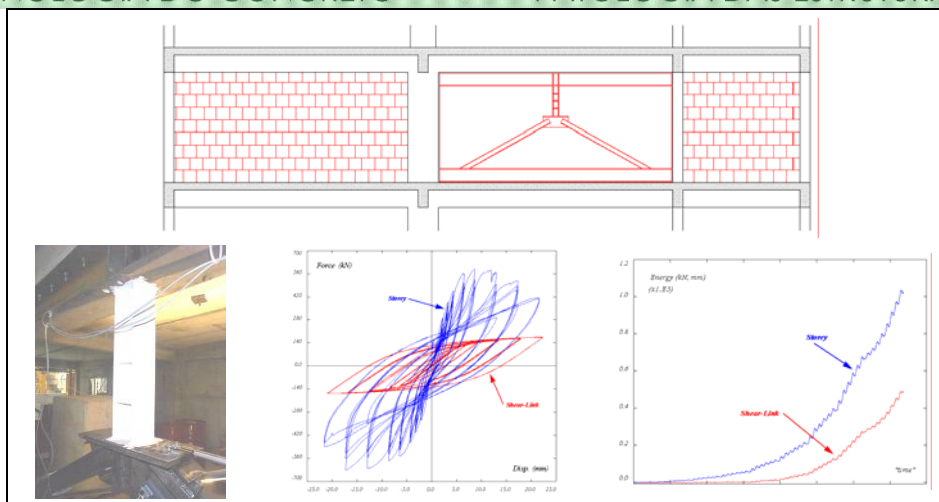


Figura 4 - Contraventamento metálico; Pormenor do dissipador de energia; Força-deslocamento e energia dissipada (total e no dissipador de energia)

### 5.4 Reparação final à base de fibras de carbono

Os últimos ensaios realizados sobre os pórticos preenchidos com painéis alvenaria provocaram danos graves nos pilares exteriores (rotura por corte na interface entre o topo dos pilares e os nós), onde se observaram, para alguns pilares, um deslocamento lateral relativo de 50 mm (aproximadamente 25% da dimensão do pilar na direcção desse deslocamento), ver Figura 5. Para além dos pilares exteriores, o pilar forte na base de um dos pórticos sofreu danos importantes, tendo evidenciado fendas de corte ao nível das suas extremidades. Estas roturas locais não permitiriam realizar os testes finais de avaliação da capacidade última de deformação dos pórticos. Assim, procedeu-se à sua reparação utilizando fibras de carbono e resinas epoxy, segundo os esquemas representados na Figura 5 [24].

As fissuras nas zonas críticas foram preenchidas com uma resina epoxy injectada. As fibras de carbono unidireccionais foram aplicadas em uma só camada para a reparação das ligações pilar/nó e para a reparação das fendas de corte do pilar, como ilustrado na Figura 5. A reparação efectuada provou ser eficiente, uma vez que os elementos reparados foram capazes de resistir aos ensaios cíclicos finais, sem que a estrutura perde-se a sua capacidade portante para cargas verticais. Da análise dos gráficos na Figura 5, pode observar-se que durante os ensaios pseudo-dinâmicos o pilar atingiu a rotura, com instalação de importantes deformações não recuperáveis. Após reparação, o mesmo pilar recuperou o comportamento elástico inicial, mantendo-o mesmo para níveis de deformação quatro vezes superiores às impostas nos ensaios pseudo-dinâmicos anteriores, sem instalação de deformações residuais.

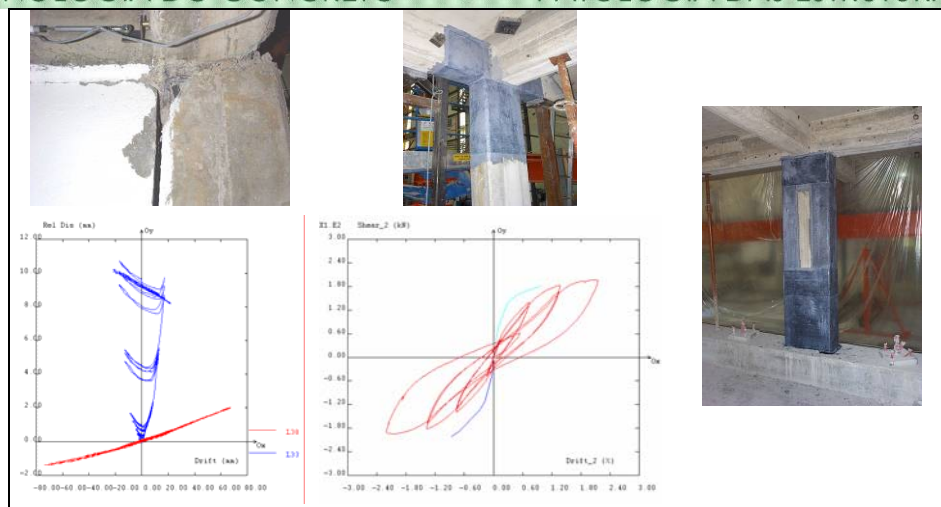


Figura 5 - Colapso dos pilares exteriores (ligação pilar/nó); Reparação dos pilares; Deformação ao nível do pilar exterior e Curvas força-deslocamento

### 5.5 Considerações finais

Foram realizados vários ensaios sísmicos, pseudo-dinâmicos, em dois modelos de pórticos de betão armado com 4 pisos, representativos de estruturas existentes, projectadas sem características sismo-resistentes específicas (prática corrente de projecto e construção dos anos 50~70). A campanha de ensaios teve como objectivos avaliar: 1) a vulnerabilidade de pórticos simples (BF); 2) a eficiência de soluções e técnicas de reforço selectivo (SR); 3) o desempenho sísmico de pórticos com painéis de alvenaria (IN); 4) os benefícios e os problemas no reforço dos painéis de alvenaria (SC).

Os resultados desta vasta campanha de ensaios, a sua análise e comparação foram revistos nesta comunicação, sendo no entanto importante realçar alguns aspectos, nomeadamente: 1) A vulnerabilidade do pórtico simples (BF) foi confirmada, pelo facto da estrutura atingir o colapso ao nível do piso 3 (2.4% *drift*) para uma acção sísmica com intensidade ligeiramente superior que a nominal (1.3 vezes em termos de aceleração de pico, correspondendo a um sismo com 975 anos de período de retorno). Note-se que o ensaio 975-yrp foi interrompido aos 7.5 segundos para evitar o colapso da estrutura; 2) A estrutura reforçada (nota: reforço sísmico deve ser entendido como uma operação que confere melhores características sismo-resistentes, podendo traduzir-se numa melhoria substancial de: capacidade de deformação inelástica – ductilidade, e/ou resistência, e/ou rigidez, e/ou capacidade de dissipação de energia, e/ou mecanismos estáveis de deformação) teve um desempenho sísmico satisfatório, suportando uma aceleração na base 1.8 vezes superior que o valor nominal, mantendo as suas funções fundamentais com danos menores e reparáveis. A irregularidade foi corrigida e a ductilidade do pilar central foi substancialmente incrementada; 3) A inclusão de painéis de alvenaria alterou totalmente o comportamento da estrutura, se comparado



## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

com o verificado para a estrutura sem alvenaria. Os painéis de alvenaria de enchimento protegem a estrutura, podendo mesmo ocultar a irregularidade estruturais (no caso da distribuição de painéis ser uniforme em altura). No entanto, os mecanismos de rotura de piso surgem subitamente, dependendo evidentemente da resistência relativa entre as alvenarias e a estrutura de betão armado; 4) O reforço das alvenarias não melhorou substancialmente as características sismo-resistentes da estrutura. Pelo contrário, em certos casos tal reforço pode desencadear danos estruturais localizados graves, tais como a rotura por corte no topo dos pilares exteriores. Assim, a aplicação de tal reforço só deve ser tida em consideração se for garantida uma transferência adequada dos esforços desenvolvidos no painel de alvenaria para as vigas adjacentes. Informação mais detalhada sobre estes ensaios, resultados e sua análise, bem como de outros ensaios relacionados com esta campanha experimental pode ser encontrada nas seguintes publicações: [21, 22, 23, 24].

Os ensaios realizados comprovaram que a vulnerabilidade destas construções, dimensionadas sem características sismo-resistentes, que constituem uma parte importante dos edifícios existentes na Europa, são uma fonte de alto risco para as populações. Foi ainda comprovado experimentalmente que soluções de reforço adequadamente seleccionadas, podem reduzir consideravelmente este risco para níveis aceitáveis de acordo com a actual filosofia dos códigos de dimensionamento e avaliação da segurança estrutural.

## 4 AGRADECIMENTOS

A componente experimental deste trabalho foi desenvolvida no âmbito do projecto *ICONS TMR-Network* (financiado pela Comissão Europeia - Contracto N. FMRX-CT96-0022). Os ensaios foram realizados no laboratório ELSA e financiados pela CE, no âmbito de "*TMR - Large-Scale Facilities*" (contracto N. FMGE-CT95-0027). Os autores agradecem a contribuição das instituições Europeias e investigadores envolvidos neste projecto, pela sua importante contribuição para a realização destes ensaios.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RSA. **Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes**. Decreto-Lei N.º 235/83, Imprensa Nacional, Casa da Moeda, Lisbon, Portugal, 1983.

[2] LNEC. **Levantamento do parque habitacional de Portugal continental para o estudo da sua vulnerabilidade sísmica com base nos CENSOS-91**. Relatório 260/00 - C3ES, LNEC, Lisbon, October 2000.

[3] SILVA-ARAYA, W.F.; RINCÓN, O.T.; O'NEILL, L.P. (eds.). **Repair and rehabilitation of reinforced concrete structures: The state-of-the-art**.

# JORNADAS DE ENGENHARIA

Fortaleza-CE (Brasil), 19 e 20 de junho de 2009

## TECNOLOGIA DO CONCRETO & PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS

International Seminar, Workshop and Exhibition, Maracaibo, Venezuela,  
Published by ASCE, April 28<sup>th</sup>-May 1<sup>st</sup> 1999.

[4] CARVALHO, E.C.; COELHO, E.; CAMPOS-COSTA, A.; SOUSA, M.L.; CANDEIAS, P.; CARVALHO, A.; MASSENA, B.; CASTRO, S.. **Seismic risk mitigation in Portugal**. Workshop on Mitigation of Seismic Risk: Support to Recently Affected European Countries, JRC, Belgirate, Italy, November 2000.

[5] EQE (<http://www.eqe.com/revamp/izmitreport/index.html>). **Report of the M7.4 Izmit earthquake**, Turkey, August 17<sup>th</sup> 1999.

[6] BERTERO, V.V.. **State-of-the-art in seismic resistant construction of structures**. 3<sup>rd</sup> International Earthquake Microzonation Conference, University of Washington, Seattle, Washington, Vol. II, pp. 767-805, 1982.

[7] ASCHHEIM, M.. **The Izmit (Kocaeli) earthquake of 17th August 1999: Preliminary observations**. EERI Reconnaissance Team - Mid-America Earthquake Center - University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.

[8] FARDIS, M.N.. **Seismic assessment and retrofit of RC structures**. Bisch, Ph.; Labbé, P.; Pecker, A. (eds.), 11<sup>th</sup> ECEE, Paris, France, Invited lecture, ISBN 90 5809 027 2, A.A. Balkema, Rotterdam, 6<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> September 1998.

[9] PINHO, R.. **Selective retrofitting of RC structures in seismic areas**. PhD Thesis, Imperial College, London, U.K., 2000.

[10] ERSOY, U.. **Seismic rehabilitation**. Second Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering: Repair & Strengthening of Existing Buildings - Istanbul, 1998.

[11] SUGANO, S.. **Seismic rehabilitation of existing concrete buildings in Japan**. 12<sup>th</sup> WCEE, Auckland, New Zealand, January 2000.

[12] MARTINEZ-ROMERO, E.. **Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures**. Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, pp. 581-626, 1993.

[13] OKADA, T.; NAKANO, Y.; KUMAZAWA, F.. **Experimental study of 1/10 scaled RC frames retrofitted with steel framed Y-shaped bracing system**. International Symposium on Earthquake Disaster Prevention, Mexico City, pp. 200-209, 1992.

[14] CALDERÓN, E.V.. **Some lessons from the March 14, 1979 earthquake in Mexico City**. 7<sup>th</sup> WCEE, Istanbul, Turkey, Vol. 4, pp. 545-552, 1980.

[15] FOUTCH, D.A.; HJELMSTAD, K.D.; CALDERÓN, E.V.. **Seismic retrofit of a RC building: A case study**. 9<sup>th</sup> WCEE, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. 7, pp. 451-456, 1988.

- [16] JARA, J.M.; AYALA, A.G.; MIRANDA, E.. **Seismic behaviour of structures with energy dissipating systems in Mexico**. 12<sup>th</sup> WCEE, Auckland, New Zealand, January 2000.
- [17] FEMA-274. **NHERP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings**. Federal Emergency Management Agency, Applied Technology Council, Washington, DC, October 1997.
- [18] MEIER, U.. **Carbon fiber-reinforced polymers: Modern materials in bridge engineering**. Structural Engineering International, IABSE, Vol. 1, pp. 7-12, 1992.
- [19] TRIANTAFILLOU, T.C. - Strengthening of structures with advanced FRP's - Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 1, No. 2, pp. 126-134 - Construction Research Communications Limited, ISSN 1365-0556, 1998.
- [20] CARVALHO, E.C.; COELHO, E.; CAMPOS-COSTA, A.. **Preparation of the full-scale tests on reinforced concrete frames**. Characteristics of the test specimens, materials and testing conditions, Report LNEC, Lisbon, 1999.
- [21] PINTO, A.V.; VERZELETTI, G.; MOLINA, J.; VARUM, H.; COELHO, E.; PINHO, R.. **Pseudo-dynamic tests on non-seismic resisting RC frames (bare and selective retrofit frames)**. Report EUR, EC, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2002.
- [22] PINTO, A.V.; VERZELETTI, G.; MOLINA, J.; VARUM, H.; COELHO, E.. **Pseudo-dynamic tests on non-seismic resisting RC frames (infilled frame and infill strengthened frame tests)**. Report EUR, EC, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2002.
- [23] BOUWKAMP, J.; GOMEZ, S.; PINTO, A.V.; VARUM, H.; MOLINA, J.. **Cyclic tests on RC frame retrofitted with k-bracing and shear-link**. Report EUR 20136 EN, EC, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2001.
- [24] VARUM, H.. **Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings**. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, 550 pp, 2003.